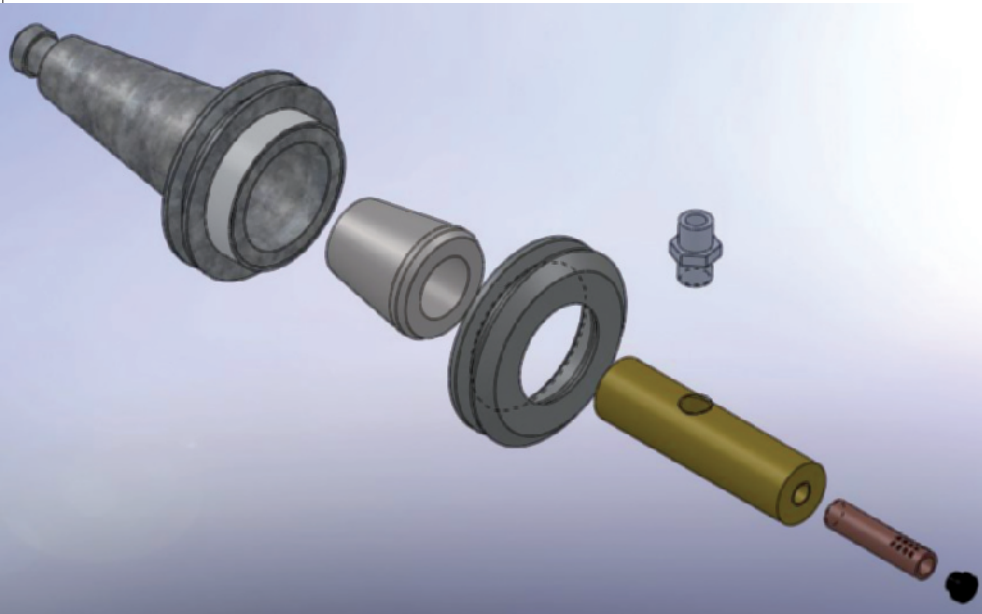




SVILUPPO DI UN SISTEMA DI FRESATURA ELETTROCHIMICA



Introduzione

Se venisse sviluppata una tecnica per sfruttare l'energia elettrochimica con un utensile semplice operando con macchine già esistenti si otterrebbe un notevole incremento di flessibilità del processo, riuscendo persino di effettuare operazioni di taglio, prendendo il nome di Electro Chemical Milling (*fresatura elettrochimica*). Nel campo della ricerca sono stati fatti

degli studi preliminari su operazioni di micro-fresatura con utensile vibrante, come riportato in [1][2]. Lo **scopo** di questo progetto è **dimostrare la fattibilità** a livello "macro".

Principio di funzionamento dell'ECM

Quando viene applicata una tensione tra due elettrodi di metallo che sono immersi in una soluzione salina chiamata *elettrolita*, la corrente passa attraverso l'elettrolita da un elettrodo all'altro grazie alla migrazione fisica di ioni (Figura 0.1). Lo scambio di elettroni tra ioni ed elettrodi favorisce il fe-

nomeno della dissoluzione anodica, il cui effetto è dominato dalla legge di Faraday:

$$V = \frac{I \cdot t \cdot N}{F \cdot n \cdot \rho}$$

Scelta della velocità di avanzamento dell'utensile

In un processo ECM tradizionale l'area di passaggio di corrente è fissata dalla forma dell'utensile, quindi si può assumere che il materiale viene asportato in una direzione, quella normale alla superficie.

È garantita una corrente costante solo se il gap g è costante, quindi per ottenere un processo stazionario l'utensile si deve muovere alla stessa velocità con cui avanza la dissoluzione anodica.

Combinando le leggi di Faraday e di Ohm la velocità di avanzamento è uguale a:

$$f = \frac{N \cdot E \cdot \eta}{F \cdot n \cdot g \cdot \rho \cdot p} = \frac{\text{Cost}}{g}$$

I simboli utilizzati vengono spiegati nella Tabella 2.1 e valori di velocità simulati sono riportati in tabella 2.3.

Vincoli sull'elettrolita

Il fango anodico può compromettere il passaggio di corrente, quindi c'è la necessità di allontanarlo dalla zona di lavoro. Questo si ottiene con un flusso continuo, capace

¹Università di Pisa
Dipartimento di Ingegneria Meccanica,
Nucleare e della Produzione
²Glasgow Caledonian University
School of Engineering and Computing

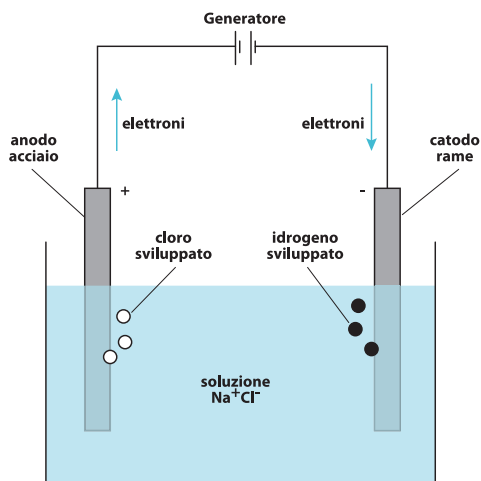


Figura 0.1: Schema di cella elettrolitica

di spazzare via le impurità e alimentare il sistema con nuovo elettrolita. Le condizioni che il flusso deve soddisfare sono: evitare surriscaldamento elettrolita e moto turbolento. Si ottengono due condizioni sulla minima velocità ammissibile v_{min} , la più alta tra le due sarà il limite inferiore.

Reazione al catodo	Reazione all'anodo	Reazioni nell'elettrolita
$2H^{+}+2e^{-}\rightarrow H_{2}\text{ (gas)}$	$Fe-2e^{-}\rightarrow Fe^{2+}$	$H_{2}O\rightarrow(OH)^{-}+H^{+}$ $NaCl\rightarrow Na^{+}+Cl^{-}$ $Fe^{2+}+2Cl^{-}\rightarrow FeCl_{2}$ $FeCl_{2}+2(OH)^{-}\rightarrow 2Cl^{-}+Fe(OH)_{2}$ <i>(fango anodico)</i> $Na^{+}+(OH)^{-}\rightarrow Na(OH)$

Requisiti dell'utensile

Il materiale viene asportato perpendicolarmente alla superficie dell'utensile. Se una faccia dell'utensile non è perpendicolare alla direzione di avanzamento c'è una variazione di gap con conseguente variazione del rateo di asportazione; il processo non è più stazionario. Se la superficie dell'utensile è parallela alla velocità di avanzamento il gap tende all'infinito, assumendo una forma parabolica. Nella pratica le superfici laterali dell'utensile vengono isolate elettricamente.

Progettazione del sistema ECMIL

L'innovazione proposta con questo pro-

getto è trovare un modo economico per aumentare le potenzialità della lavorazione elettrochimica **per creare delle scanalature** di forma in un pezzo di acciaio muovendolo in tutte le direzioni del piano normale all'asse del mandrino, convenzionalmente identificato come **X-Y**. A tal fine si propone di impiegare un utensile **semplice** come un tubo di rame. Il problema di base è che in questo processo si inverte il ruolo tra superficie laterale e superficie frontale. Il fatto di utilizzare un elemento cilindrico introduce il problema schematizzato in Figura 2.1. [3] descrive l'evoluzione del gap frontale e laterale con utensile fermo:

TABELLA 2.1: VELOCITÀ DI AVANZAMENTO IN FUNZIONE DELLA VARIAZIONE DI TENSIONE A GAP COSTANTE									
N	E	η	r	F	n	ρ	Costant	g_0	f
Massa atomica	Tensione	rendimento	Resistività	Costante di Faraday	valenza	densità		gap	Feed rate
g	V		$\Omega \cdot mm$	A · s		$\frac{g}{mm^3}$	$\frac{\eta \cdot E \cdot N}{r \cdot F \cdot N \cdot \rho}$	mm	$\frac{mm}{s}$
56	14	0.8	0.5	96500	2	0.00787	0.83	0.5	1.65
56	15	0.8	0.5	96500	2	0.00787	0.88	0.5	1.77
56	16	0.8	0.5	96500	2	0.00787	0.94	0.5	1.89

TABELLA 2.2: VELOCITÀ DI AVANZAMENTO IN FUNZIONE DEL GAP INIZIALE A TENSIONE COSTANTE									
N	E	η	r	F	n	ρ	Costant	g_0	f
g	V		$\Omega \cdot mm$	A · s		$\frac{g}{mm^3}$	$\frac{\eta \cdot E \cdot N}{r \cdot F \cdot N \cdot \rho}$	mm	$\frac{mm}{s}$
56	16	0.8	0.5	96500	2	0.00787	0.94	0.3	3.15
56	16	0.8	0.5	96500	2	0.00787	0.94	0.4	2.36
56	16	0.8	0.5	96500	2	0.00787	0.94	0.5	1.89

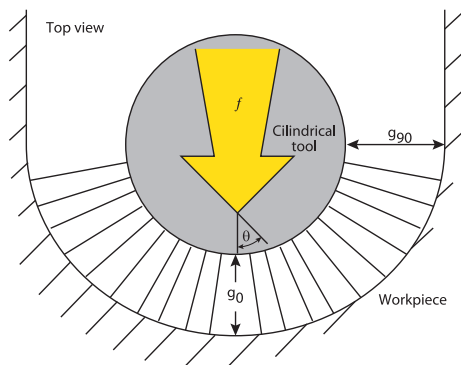


Figura 2.1: La superficie perpendicolare alla direzione di avanzamento è una linea

$$g = g_0 + \frac{\eta \cdot J}{F \cdot \rho} \cdot t$$

$$g_{90} = 0.19536 \cdot g + 0.5779$$

In questa maniera è possibile determinare in maniera approssimativa il sovradimensionamento della scanalatura.

In seguito saranno fatte forti approssimazioni sulla scelta dei parametri operativi e delle attrezzature utilizzate perché lo scopo primario è quello di dimostrare la fattibilità di un **processo del tutto nuovo** e quindi **soggetto a importanti modifiche in corso d'opera**.

Scelta della velocità di avanzamento dell'utensile f

Sono stati creati due fogli di calcolo (Tabella 2.1 e Tabella 2.2) nei quali sono evidenziati i parametri selezionati per lo svolgimento delle prime prove.

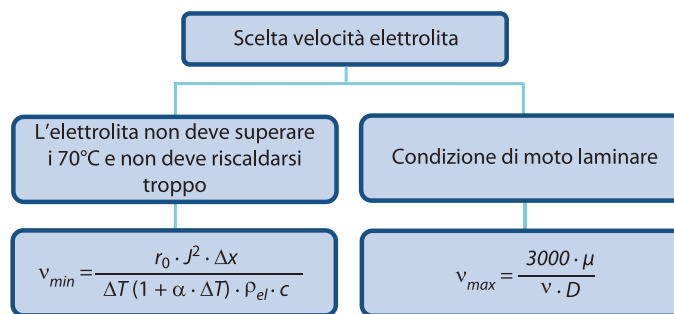


Figura 2.2: Schema riportante i limiti di velocità accettabili

Realizzazione dell'impianto di circolazione dell'elettrolita

Il fluido raggiunge la zona di lavorazione da un foro creato sul fianco dell'utensile; per garantire una direzionalità del fluido in uscita dalla zona in lavorazione è stato scelto di avere un flusso laminare al contrario del processo tradizionale, quindi invece di avere due condizioni di minima velocità si ottengono gli estremi di un intervallo di accettabilità (Figura 2.2).

Nonostante la sua semplicità il sistema di alimentazione dell'elettrolita rappresenta un punto fondamentale per la riuscita di una lavorazione di qualità.

Siccome si deve rispettare questo intervallo, la velocità dell'elettrolita all'ingresso del gap viene scelta come media aritmetica tra i due estremi; con questa vengono ricavate le caratteristiche della pompa, la quale deve fornire una pressione di 0.19 MPa = 1.9 bar e una portata di $1.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$. Il fluido in uscita dalla zona di lavorazione deve essere filtrato prima di poter essere

ρ_{el} = densità elettrolita
 r_0 = resistività cond. st.
 Δx = lunghezza canale
 J = densità di corrente
 c = calore specifico
 α = conduc. termica
 D = diametro idraulico
 μ = viscosità

immesso nuovamente in circolo in quanto il fango anodico potrebbe compromettere il corretto funzionamento della pompa. Gli esperimenti sono stati fatti usando una soluzione salina di NaCl al 12% dato il costo e la facilità di reperibilità; questa è in grado di condurre elettricità, ma crea problemi di corrosione.

In fase preliminare è stata utilizzata una pompa di circolazione già presente in laboratorio e riadattata all'uso con una vasca di deposito, avente portata costante di 0.253 l/s e un piccolo filtro interno.

Realizzazione dell'utensile e del suo sistema di sostegno

In Figura 2.3 è mostrato l'utensile; questo è un tubo di rame collegato mediante vite ad un tubo di ottone; l'impianto elettrico e l'impianto di alimentazione dell'elettrolita sono collegati tramite connettori rapidi a quest'ultimo, che svolge la funzione di camera per mantenere costante la pressione dell'elettrolita e assicurarne la continuità di alimentazione. L'utensile viene movimen-

TABELLA 2.3: ESEMPIO DI CALCOLO DEI LIMITI DI VELOCITÀ IN FUNZIONE DEL GAP INIZIALE

m_e	ρ_e	g_0	E-ΔE	C_{se}	$1/r_0$	α	Δx	$V_{min}(\Delta T)$	$V_{max}(Re)$	Valore medio
Pa s	kg/m ³	mm	V	J/kg°C	Ω ⁻¹ m ⁻¹	°C ⁻¹	mm	m/s	m/s	m/s
0,003	1000	0,25	12	4186	16	0,02	4	4,2	18	11,1
0,003	1000	0,3	12	4186	16	0,02	4	2,9	15	9
0,003	1000	0,4	12	4186	16	0,02	4	1,7	11,3	6,5
0,003	1000	0,5	12	4186	16	0,02	4	1,1	9	5

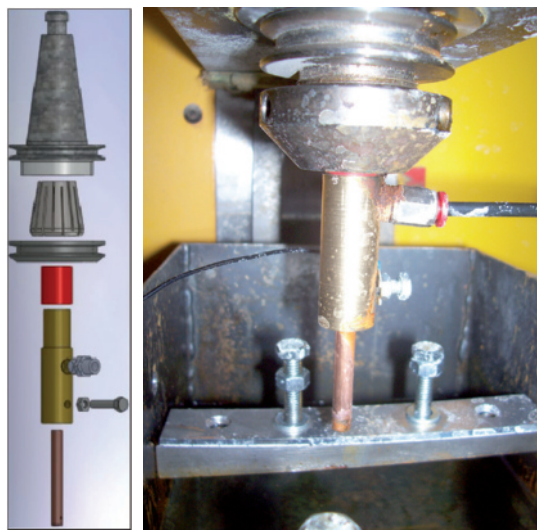


Figura 2.3: Utensile (a) progettato e (b) realizzato

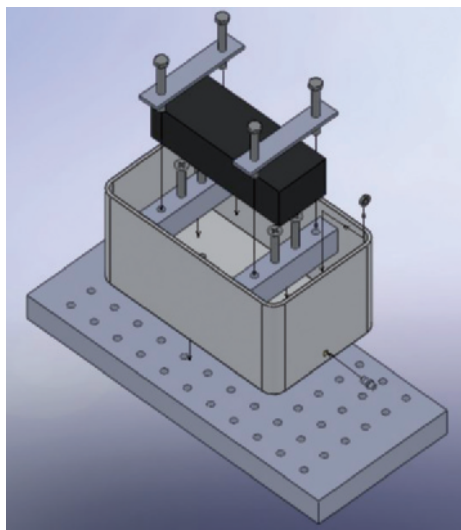


Figura 2.4: Vasca di raccolta con sistema di bloccaggio pezzo (a) progettato e (b) realizzato

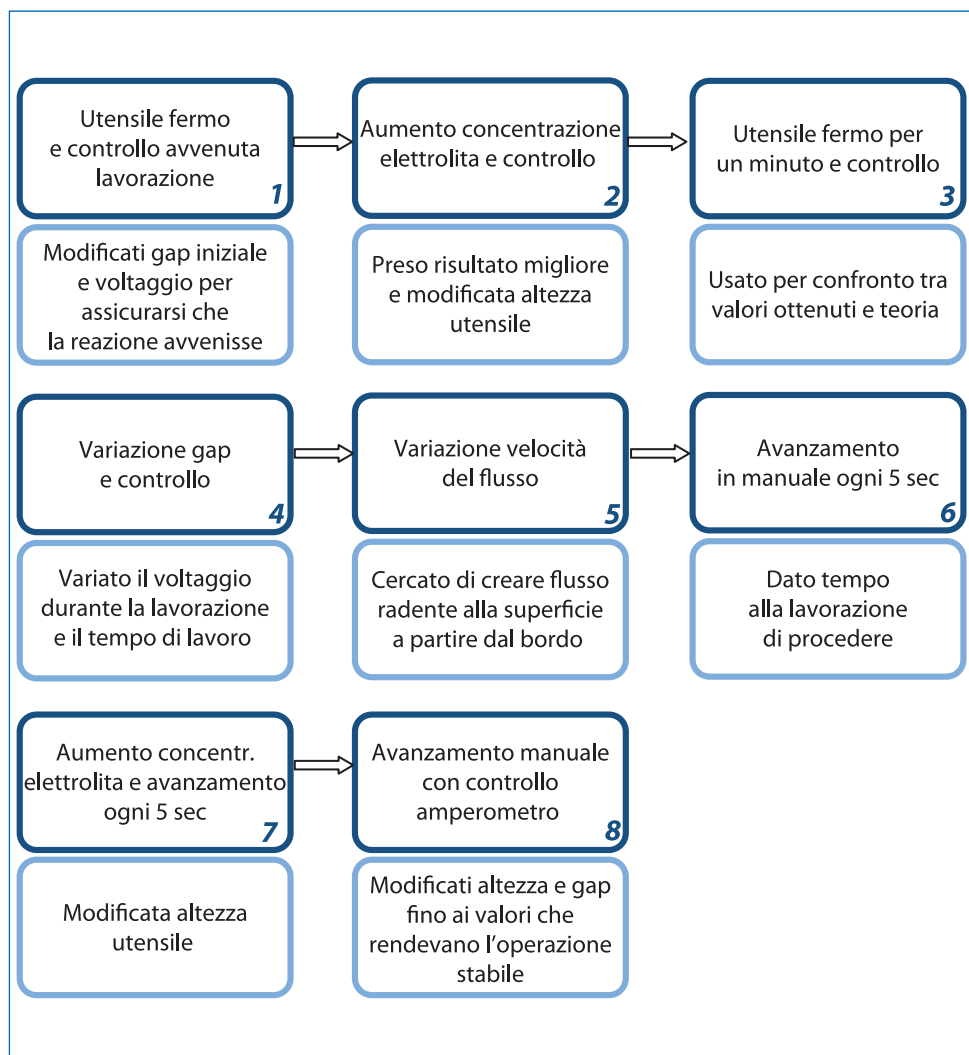


Figura 3.1: Schema pianificazione prove

tato da una fresatrice a controllo numerico con software di controllo e dotata di motori a passo, cosa che ne limita l'impiego a basse velocità. Come prima fase è stato deciso di non isolare l'utensile in alcuna maniera e di utilizzare le stesse formule espresse finora.

Pezzo da lavorare e realizzazione dei suoi afferraggi

La modalità di afferraggio del pezzo è stata studiata in modo da consentire la raccolta dell'elettrolita dopo la fase di lavoro e di evitare il contatto tra il pezzo e il liquido accumulatosi sul fondo del contenitore, come da Figura 2.4.

Prove sperimentali

Le prove pianificate come in Figura 3.1 sono state effettuate in varie fasi in modo da estrapolare sperimentalmente i migliori parametri operativi.

Dopo ogni prova il pezzo è stato rimosso e analizzato visivamente; dopodiché è stato posizionato nuovamente nella zona di lavoro richiedendo l'azzeramento degli assi. I risultati più significativi sono stati contrassegnati e fotografati (Figura 4.1).

Analisi dei risultati

Di seguito si riportano le immagini delle lavorazioni contrassegnate. Le prime fasi so-

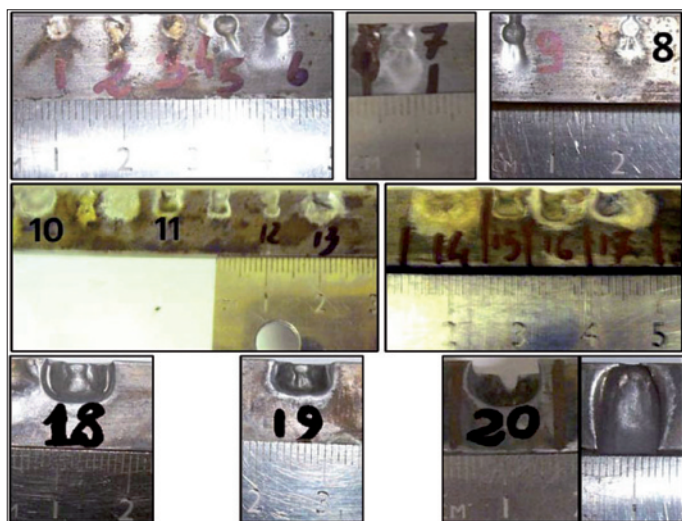


TABELLA 4.1: VARIAZIONE RESISTIVITÀ NEL TEMPO

g_0 [mm]	t [mm:ss]	Ideal Current density [A/mm ²]	Real Current density [A/mm ²]	Real Resistivity [Ω·mm]
0.36	00:00	58	0	Infinite
0.36	01:00	58	0.08	454
0.22	15:00	58	0.1	445
0.14	25:00	58	0.2	437
0.11	35:00	58	0.3	445

Figura 4.1:
Immagini campioni
fotografati

no caratterizzate da una grande variabilità di parametri iniziali per valutare il processo. La profondità dell'utensile è stata variata in modo da ottenere lavorazione per tutta la sua altezza; i risultati migliori sono stati ottenuti quando il foro di uscita dell'elettrolita era esattamente all'altezza dello spigolo del pezzo, quindi il fluido si divideva su due facce. La scelta di regolare la velocità del flusso aprendo parzialmente la valvola a valle della pompa è stata presa in quanto l'elettrolita rimbalzava sulla superficie del pezzo, permettendo così la lavorazione solo in una zona limitata; gli spruzzi risultanti hanno investito anche l'utensile e hanno creato un ponte tra esso e la macchina, facendo un cortocircuito. Nelle ultime prove l'avanzamento è stato fatto in modo da mantenere costante il valore di corrente prefissato, il quale è stato aumentato in fase di lavorazione. Da un confronto tra valori reali e valori calcolati e si nota una notevole differenza nella densità di corrente poiché l'elettrolita non possedeva le caratteristiche ideali per problemi di filtraggio e di velocità del flusso e quindi può aver assunto una resistività molto superiore a quella ipotizzata, come si deduce dalla Tabella 4.1. L'aumento di corrente durante la lavorazione deriva dalla crescente possibilità di lavorare con gap inferiori. Una spiegazione può essere che dopo una fase instabile iniziale l'elettrolita raggiunge

una sua direzionalità e quindi permette di ottenere una fase stabile. Il limite di corrente ammissibile è stato dato dal generatore, troppo poco potente per raggiungere lo scopo. L'ultima prova effettuata ha portato alla creazione di una scanalatura quasi completa (come da Figura 4.1); non è stato possibile concludere la lavorazione in quanto il foro di uscita dell'elettrolita aveva raggiunto e superato la faccia opposta, quindi nelle zone nel suo intorno non è stato possibile il passaggio di corrente.

Date le forti approssimazioni non è stato effettuato un controllo dimensionale, riservandolo per controlli successivi ad ulteriori sviluppi. Gli ultimi test effettuati dimostrano che con un controllo sui parametri fondamentali di lavorazione la prova può essere ripetuta ottenendo risultati paragonabili. Il procedimento può essere standardizzato passando da un controllo manuale ad un controllo elettronico lavorando nella seguente maniera:

- Uso di una pompa che permetta di regolare elettronicamente la velocità del fluido e controllo della velocità elettrolita da utilizzare come feed-back;
- Controllo della costanza del gap e della corrente con sistema di controllo in retroazione;
- Sistema di misura della scanalatura ad alta precisione, come laser o microscopio elettronico.

Conclusioni

Le prove sperimentali sul dimostratore della tecnologia ECMIL sviluppato ha mostrato risultati incoraggianti.

Le attività previste per incrementare il passaggio di corrente sono:

- Modifica del foro di uscita dell'elettrolita nell'utensile oppure fornire elettrolita dall'esterno;
- Uso di un generatore più potente e tensione alternata;
- Utilizzo di un differente elettrolita, preferendo una soluzione salina di NaNO_3 .

© RIPRODUZIONE RISERVATA

Ringraziamenti

Studio sviluppato dallo studente Luca Del Moro presso la Glasgow University come tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica della Facoltà di Ingegneria anno accademico 2009-10 con contributo di mobilità dell'Università di Pisa.

Bibliografia

- [1] B. H. Kim, S. H. Ryu, D. K. Choi, C. N. Chu: *Micro electrochemical milling, Journal of micromechanics and microengineering* Vol. 15 (2005) pp. 124-129.
- [2] A. De Silva, T. Pajak, K. Mediliyegedara: *Investigation of the process principles and mechanism of Electrochemical Milling (ECMIL), Glasgow Caledonian University internal report (2010) pp. 1-11.*
- [3] V. K. Jain, P. C. Pandey: *Tooling design for ECM, Precision engineering (1980) pp. 195-206.*